

# ADCPを用いた洪水流観測の 計測精度評価に関する総合的検討

## DISCUSSION OF ACCURACY EVALUATION METHODS FOR FLOOD FLOW OBSERVATION BY TOWING ADCP

岡田将治<sup>1</sup>・萬矢敦啓<sup>2</sup>・橘田隆史<sup>3</sup>・菅野裕也<sup>4</sup>・深見和彦<sup>5</sup>  
Shoji OKADA, Atsuhiko YOROZUYA, Takashi KITSUDA, Yuya KANNO and Kazuhiko FUKAMI

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 修士(農学) (株)ハイドロシステム開発 (〒552-0007 大阪府大阪市港区弁天5丁目10-23)

<sup>4</sup>正会員 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

<sup>5</sup>正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)

The authors have been developing an accuracy-evaluation method for flood flow observation with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Several field measurements were conducted under severe ADCP measurement conditions characterized by high velocity and highly-frequent water-surface vibration. This paper described main factors which influence the accuracy of velocity/water-depth measurements and reviewed previous observation results. To finalize the development of the accuracy-evaluation methods, the authors conducted field measurements under severe conditions with highly sophisticated devices and verified the method with high-quality datasets. Finally it was applied to previous flood observation results obtained in the Shimanto River.

**Key Words :** *Acoustic Doppler Current Profiler, Towing flood flow observation, Accurate evaluation method*

### 1. 序論

近年、洪水流観測技術を大きく向上させるADCPに代表される計測機器の開発やそれらを活用した研究も多く報告されるようになってきたことから、条件さえ整えば洪水時においても詳細な流速分布や河床形状の計測が可能になってきた。これらの計測技術が進展していく過程においては、当然のことながら、計測精度の評価法についても並行して検討しておく必要があるが、わが国で観測の対象となる高速で、かつ水面が大きく変動する洪水流の観測精度評価については、その難しさから十分な検討がなされてこなかった。しかし、近年の日本国内におけるADCP観測技術へのニーズは、断面流量計測にとどまらず、河川構造物や樹木群周辺の流況計測、流れと河床変動の同時計測等まで広がっており、USGSが従来から提案している評価手法<sup>1)</sup>をそのまま採用するのではなく、河川の流況特性や今後の観測者のニーズに対応できる日本独自の評価手法の確立が必要と考える。筆者らは、これまでADCPを用いた計測手法やデータ処理技術の検討に併せて、計測精度評価法についても検討を進めてき

た。移動観測における計測精度の評価指標として、単位移動距離あたりの流速計測値に含まれる計測誤差の標準偏差を偏差流速と定義<sup>2)</sup>し、流速場および断面流量の計測精度をそれぞれ偏差流速比、偏差流量比と提案している。偏差流速は、ADCPの設定条件や移動速度によって一義的に決定できるものの、洪水流観測時に搭載ボートの揺動が大きい場合には、ADCP観測では河床高計測に関して傾斜角補正を行っていないこと、ADCPの傾斜センサーが旧式の液面検知式であることから、計測精度の低下が示唆された<sup>3)</sup>。そこで、大型水槽実験および利根川の高流速部における流況観測<sup>4),5)</sup>を行い、ADCPの揺動(傾斜角)の計測特性およびそれが水深および流速計測値に及ぼす影響を定量的に評価した結果、少ないサンプル数ではあったものの、高精度の傾斜(MEMS)センサーを用いて傾斜角補正を行った場合と比較しても、断面流量値に有意な差が見られないという重要な知見を得た。

本研究では、これらのADCPを用いた洪水観測における計測精度の評価手法について総括することを目的として、はじめにADCPの計測値に影響を及ぼす主要因とこれまでにを行った検証結果についてまとめる。つぎに、

利根川において既往の研究<sup>4)</sup>と同様な計測を数多く行い、ボートの揺動が計測値に及ぼす影響について再度検証を行う。さらに、四万十川において、2009年台風9号出水中の5000m<sup>3</sup>/sおよび4000m<sup>3</sup>/s規模の洪水流観測結果を用いて、著者らが提案する偏差流速比および偏差流量比を適用した計測精度の検証事例を示す。

## 2. ADCPの移動観測データの精度評価指標と計測値に影響を及ぼす主な要因

### (1) 移動観測における計測精度評価指標<sup>2)</sup>

ADCPを用いた固定観測では、機器の計測設定条件(計測モード、計測層厚および層数等)が決まれば、同じ地点に発射する超音波の発射回数(ウォーターピング数)が多いほど得られたデータの信頼性(計測精度)は高くなる。したがって、移動観測の場合にも空間解像度を上げるためには、ADCPの機器特性<sup>9)</sup>を考慮して、ある程度時間をかけて計測することが望ましい。しかし、実際には各地点の流況によってボートの揺動や跳躍によるデータ欠損を抑えるために移動速度を調整することから、空間解像度は場所によって異なる。したがって、移動観測の場合には図-1に示すような固定観測精度の考え方を空間的に拡張して、単位移動距離あたりの計測精度と捉え、流量の場合は、断面全体の平均的な計測精度として評価するのが合理的である。

そこで、著者らは移動観測における計測精度を表す指標として、単位移動距離(大川では5mを想定)あたりの流速計測値が含む計測誤差の標準偏差を偏差流速(Deviation Velocity)、偏差流速を断面全体で積分したものを偏差流量と定義している。例えば、偏差流量とは計測された断面流量値に対して、どの程度の誤差分を含むかを示すものであり、USGSの流量観測の精度管理に係わるガイドライン<sup>1)</sup>のように、往復計測を行った際の横断面流量誤差が5%以内であっても、ADCPの計測設定条件および計測時間により、この指標が異なるため、計測したデータの精度評価が容易となる。また、計測データがひとつ(片道分)しか無い場合でも評価が可能となる。

### (2) ADCPの計測値に影響を及ぼす主な要因と検証事例

ADCPの計測値に影響を及ぼす主な要因は、わが国の洪水流を想定すれば、河床変動が生じる場合およびボートが揺動・跳躍する場合の大きく2点である。前者は、ADCPは流速を算出する際に河床は移動していないという仮定のもとで、ボトムトラッキングを行い、ボートの移動速度と流水速度を分けて算出しているために生じる。この問題については、Muller<sup>7)</sup>により、補正方法を含めて提案されているが、最近の観測事例ではボートの移動速度をRTK-GPSによる高精度な測位データから求め、流水の相対的な速度を算出する方法が一般的となっている。後者のボートの揺動・跳躍に関しては、

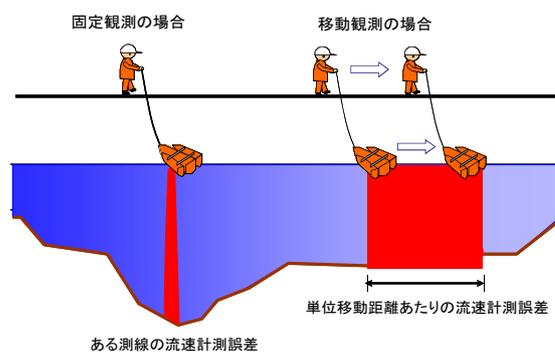


図-1 移動観測データの精度評価手法のイメージ

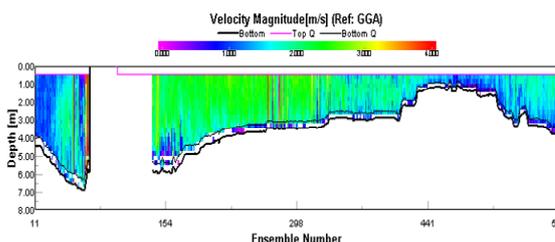


図-2 データ欠測が多いADCP流況観測事例<sup>9)</sup>

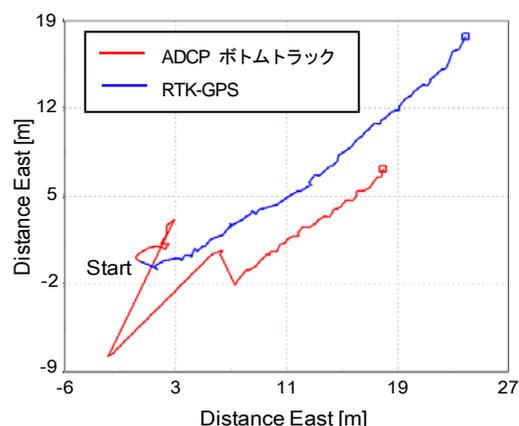


図-3 ADCPのボトムトラッキング機能とRTK-GPSによる航跡の比較

データの取得率にも影響し、図-2に示すように流況が激しい区間ではデータ欠測が生じることもあるため、この課題への対策が最も重要と認識されている。また、図-3のように河床が移動してない場合でも、ADCPのボトムトラッキングだけでは正確な航跡を取得できない状況が起こる。この事例からもADCPの洪水流計測にRTK-GPSを併用することが有効であるといえる。さらに、データが取得できた場合でも、ボートの揺動が大きい場合には、ADCPの計測精度が低下する可能性があることを指摘した<sup>3)</sup>。すなわち、ボートの傾斜角が大きい計測条件でADCPが傾斜角補正を行っていない点、さらに、その補正を行うとしても、ADCPに内蔵されている傾斜センサーが旧式の液面感知タイプであるため、周期が短い揺動に対して追従できているかの2点である。著者ら<sup>4)5)</sup>は、大型水槽を用いて静水中でADCP搭載ボートを種々の周期で揺動させ、傾斜角および水深の計測特性を検証して

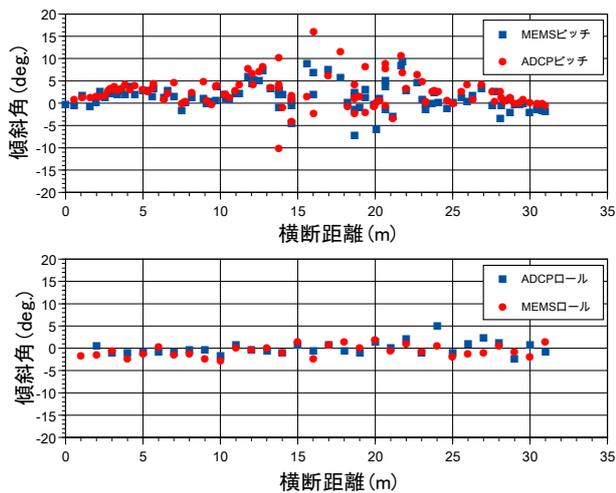


図-4 ADCPおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角の時系列

いる。その結果、厳しい洪水観測を想定した条件(揺動振幅±15度が定常的に続く)において、ボートの揺動周期が1~2秒程度まで短くなると、ADCPの内部傾斜センサーが追従できず、傾斜角を過小評価(周期1秒では約1/2)すること、ボートの傾斜角(ADCPの計測値)15度を閾値とすれば、傾斜による補正を行わずに単純にADCPの4つのビーム長さを平均値して水深とする場合でも、計測精度5%以内を十分確保できることを明らかにした。さらに、現地河川において高速流の流量観測を行った結果、高精度のMEMS傾斜センサーを用いて揺動による流速計測値の補正を行っても、断面積分した流量値に補正前との有意な差が見られなかった。著者らはこの結果に対し、ADCPの計測特性として、経験的にデータ欠損が生じない傾斜角15度以内では流速は実際の値よりも最大5%程度小さく出力される一方、水深は実際の値よりも最大5%程度大きく出力されることが要因であると指摘した。これらの結果は、洪水観測の精度評価において重要な知見となったが、RTK-GPSおよびMEMSセンサーを併用した観測のサンプルデータ数が少なかったため、同様な計測を再検証する必要があるとした。

### 3. 利根川高流速部におけるボートの揺動がADCP計測値に及ぼす影響に関する再検証

ボートの揺動がADCPの計測値に及ぼす影響に関する再検証は、著者らの洪水観測に適したボートの検討と併せて行った。観測地点および観測条件の詳細については、既発表の論文<sup>8)</sup>と同様のため、そちらを参照されたい。この観測区間では、約40mの川幅で平水時においても流速が最大4m/sを超える地点があり、水面が大きく変動する流況であるため、洪水観測を想定した計測が常時可能である。本観測では、RTK-GPSとMEMSセンサーを搭載したADCPボートを用いて河道の横断方向に4往復(8回)し、さらに河道中央の高流速部において約5分間の定点計測を行った。図-4にADCPの内部傾斜セン

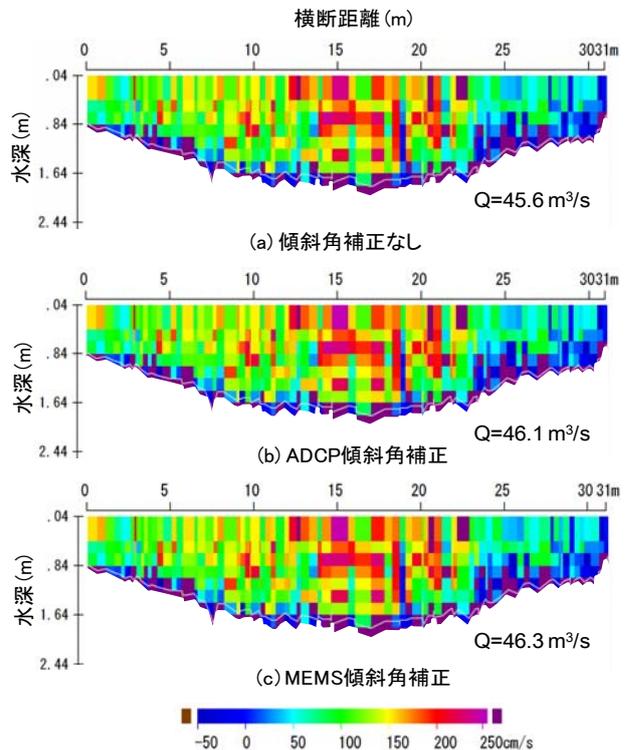


図-5 ADCPおよびMEMSセンサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速分布の比較

サーとMEMSセンサーで計測したピッチ(縦揺れ)角、ロール(横揺れ)角の時系列を、図-5にADCPおよびMEMS傾斜センサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速コンターおよび断面流量を示す。横軸は両図とも計測開始地点(左岸水際)からの横断距離を表している。図-4に示すロール角はほぼ±2~3度以内となっており、ADCPの内部センサーとMEMSセンサーの値に大きな差は見られない。一方、ピッチ角については河道中央部を計測している時間帯(10秒から25秒後)にADCPで最大16度となっているものの、全体ではほとんど5~10度の範囲に収まっている。図-4においてピッチ角が大きい値をとった箇所は、表面流速が横断方向に大きく変化する区間であり、最大で2.5m/s程度であった。図-5(a)は通常ADCP観測で出力される流速分布であり、傾斜角補正は行われていない。Teledyne RDI社が公表している手法<sup>9)</sup>により、ADCPの内部センサーとMEMSセンサーの傾斜角データを用いて各グリッドにおける流速値の傾斜角補正を行った結果が図-5(b)および図-5(c)である。傾斜角補正の有無による流速分布の違いは見られず、断面流量を算出した結果についても、傾斜角補正無しの場合に45.6m<sup>3</sup>/s、ADCPの傾斜角で補正したものが46.1m<sup>3</sup>/s、MEMSセンサーの傾斜角で補正したものが46.3m<sup>3</sup>/sと相対差は1%未満となった。また、複数回行った他のケースも同様な結果が得られた。これは、著者ら<sup>4),5)</sup>がこの傾斜角補正法を用いて流速値に与える影響を調べた結果と一致するものである。すなわち、図-4に示したADCP搭載ボートの傾斜角はロール角が0度で、ピッチ角が±5度であれば、実際の流速よりも0.37%小さく出力され、

ピッチ角が±10度でも、1.52%小さく出力される程度である。したがって、傾斜角補正を行うことにより、各地点の傾斜角および水深に応じて、補正前の単位幅流量が大きくなるアンサンブルと小さくなるアンサンブルが混在し、横断方向に断面積分して流量換算すると有意な差がみられなくなる。

このことから、再検証のために行った現地観測からもボートの揺動自体がADCPの水深および流速値に及ぼす影響は小さく、厳しい条件の洪水流計測においても傾斜角を15度以下に抑え、確実にデータを取得することができれば、ADCP機器性能上の計測精度は最大でも5%程度と考えればよいといえる。

#### 4. 四万十川における2009年台風9号洪水観測データの計測精度評価

3章の結果によって、わが国特有の流況特性を有する洪水流に対しても著者らが提案してきた偏差流速比および偏差流量比を用いたADCPの移動観測時の計測精度評価が十分可能であることがわかった。本章では2009年に現地観測を行った四万十川の洪水流に適用し、流量観測精度について考察する。図-6に四万十川具同地点における2009年台風9号出水時のほぼピーク時の状況を示す。ピーク時には高水敷も2m程度冠水しており、複断面流れの状況であった。図-7に2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフを示す。四万十川流域では、8月6～7日にかけて累計100mm程度の降雨があり、8日に一旦収まったものの、日本の南で台風9号が発生し、その影響を受けて9～10日朝にかけて累計450mm程度のまとまった降雨により、水位が上昇した。

水位は通称赤鉄橋と言われる四万十川橋に設置された具同水位観測所において計測しているが、上下流区間の流況を把握する目的で橋から上流側350m地点、下流側100m(浮子観測区間の中間地点)および250mの地点に簡易水位計を計3台設置している。

洪水流観測は、2名の観測者がロープに繋いだADCP専用ボートを四万十川橋上から約50m下流の最深河床断面付近を横断方向に約450m(ピーク時)曳航させて行った。本観測では1回(片道分)の計測時間をおよそ10～12分間(横断移動速度0.6～0.75m/s程度)とし、単位移動距離あたりのADCPの超音波の発射回数を多くして偏差流速を小さく抑え、横断面内の平均的な流況場を計測している。これについては、往復計測を行った際の断面流速分布がほぼ同様になることから確認している。一方、1回の流量計測に時間を要してしまうことから、断面流量としては往復計測を行った際の平均値を採用している。2009年8月10日の洪水期間中に計16回(8往復分)のデータを得ることができた。洪水流量としては四万十川では中規模クラスであるが、ADCPで橋上観測を行った公表データとしては、これまでで最大級であることを特筆し



図-6 2009年台風9号による出水状況(ピーク水位)

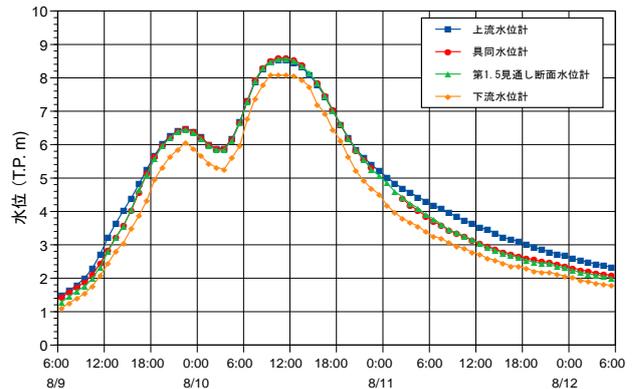


図-7 2009年8月9日～12日における具同地点上下流の水位ハイドログラフと観測期間

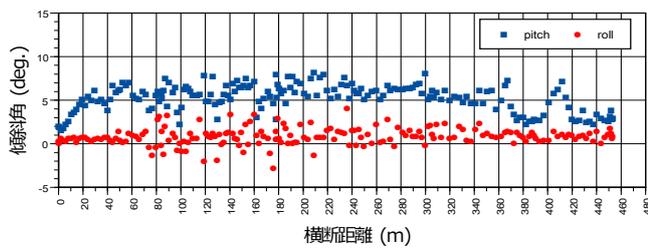
表-1 四万十川現地観測におけるADCPの計測設定条件

Workhorse ADCP 1200kHz	
計測モード	Mode12
計測層厚	0.30m
計測層数	1-3往復目: 70層 4-8往復目: 65層
アンサンブルタイム	70層: 3.31秒 65層: 3.14秒
ウォーターピング数	5ピング (サブ3ピング)
ボトムトラック機能	有り (5ピング)
固定観測における偏差流速	3.28cm/s

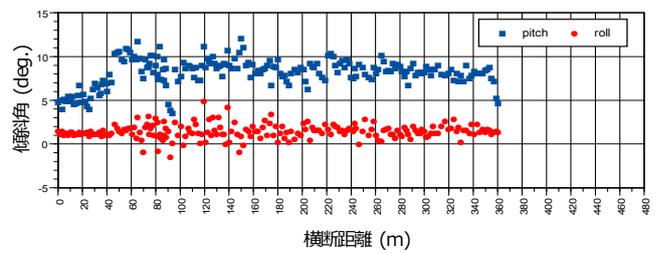
ておく。この観測では、ADCPが計測したデータを無線で岸に設置した専用PCに送信し、リアルタイムに流速分布、断面流量が把握することができる現在最も良く用いられている手法を採用している。表-1にADCPの計測設定条件を示す。水位に応じて計測層数とアンサンブルタイムを変更して観測を行っており、固定観測における偏差流速は3.28cm/sである。

図-8にADCPで計測した流量5095m<sup>3</sup>/sおよび3992m<sup>3</sup>/s時の(a)傾斜角、(b)流速分布、(c)偏差流速分布、偏差流量および偏差流量比、(d)偏差流速比分布を示す。横軸は観測開始点(右岸水際)からの横断距離を表している。

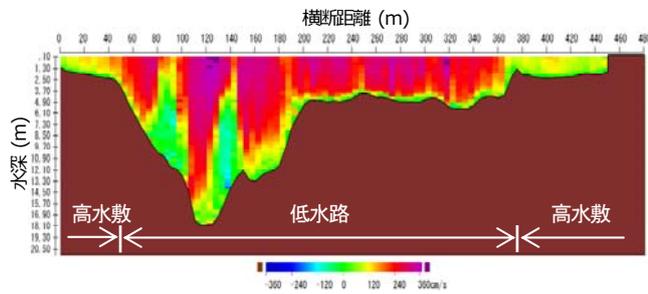
図-8(a)の傾斜角と図-8(b)の流速分布を併せてみると、低水路区間の流速が2m/sを超える流れ場では、ピッチ角が定常的に7度～10度となっており、ロール角は滯筋部(横断距離40m～360m付近)において揺動がみられる。



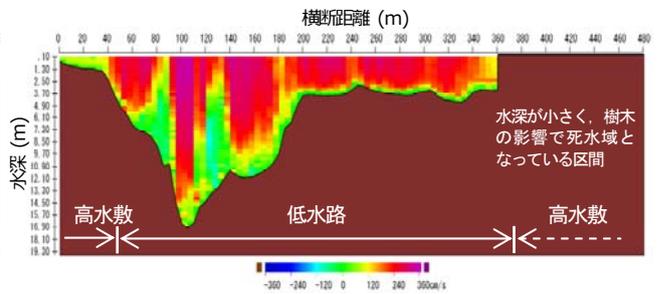
(a) ADCPの傾斜角 ( $Q=5095\text{m}^3/\text{s}$ )



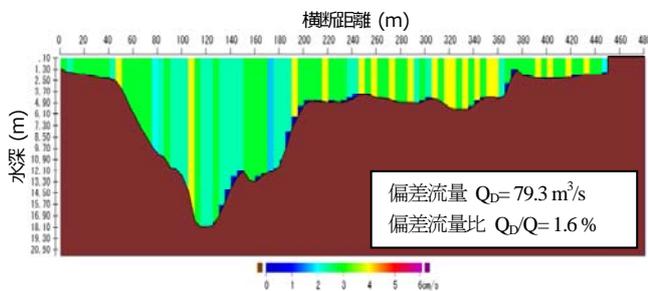
(a) ADCPの傾斜角 ( $Q=3992\text{m}^3/\text{s}$ )



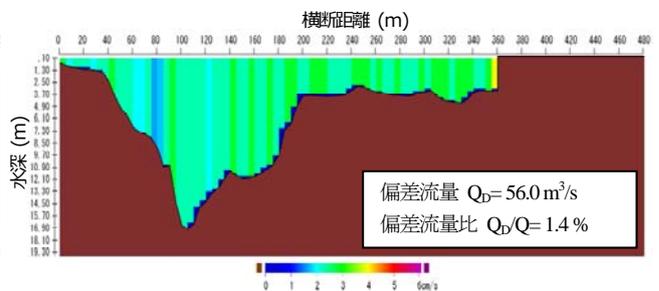
(b) 流下軸方向の流速分布 ( $Q=5095\text{m}^3/\text{s}$ )



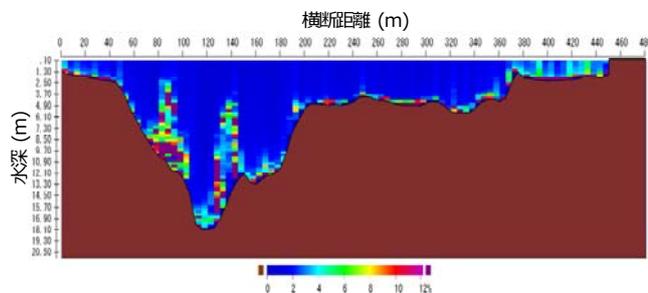
(b) 流下軸方向の流速分布 ( $Q=3992\text{m}^3/\text{s}$ )



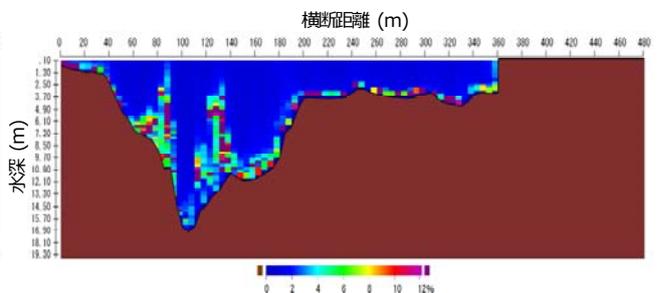
(c) 偏差流速分布 ( $Q=5095\text{m}^3/\text{s}$ )



(c) 偏差流速分布 ( $Q=3992\text{m}^3/\text{s}$ )



(d) 偏差流速比分布 ( $Q=5095\text{m}^3/\text{s}$ )



(d) 偏差流速比分布 ( $Q=3992\text{m}^3/\text{s}$ )

図-8 ADCPで観測した傾斜角、流速分布、断面流量、偏差流速および偏差流速比分布

この区間では表面付近の流速が毎秒3.5mを超える地点もあり、さらに橋脚および床固工の後流による周期的な渦が発生し、横断方向に移動させる際にボートの揺動振幅が±3度程度になっている。また、橋脚および床固工の影響により低流速域が確認でき、どちらの流量規模においても同様な流速分布が形成されている。この地点では近年局所的洗掘が進んでいることから、著者ら<sup>10)</sup>は本観測結果を用いて3次元流況解析を行って詳細な流れ場を明らかにし、洗掘対策や洪水時の浮子を用いた流量観測精度向上のための基礎資料としている。つぎに、著者らが計測精度評価指標として提案する偏差流速をボートの単位移動距離(本観測では5mに設定)あたりのピング(超音波発射)数から、横断分布にしたものが図-8(c)である。

ボートを移動させる速度によって、偏差流速は異なるものの、流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は1cm/s～4cm/sである。この偏差流速を断面積分したものが偏差流量 $Q_D$ であり、計測された断面流量 $Q$ との比が偏差流量比である。流量が $5095\text{m}^3/\text{s}$ の場合、偏差流量 $Q_D$ は $79.9\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.6%である。同様に流量が $3992\text{m}^3/\text{s}$ の場合には偏差流量 $Q_D$ は $56.0\text{m}^3/\text{s}$ であり、偏差流量比は1.4%となる。したがって、本観測で得られた断面流量値に含まれる誤差分はわずか1.5%程度である。つぎに、図-8(d)に示す各グリッドの流速値と偏差流速の比をみると、全断面を通して1～2%であるが、構造物の後流の影響を受ける領域では流速が小さい分、偏差流速比は12%程度まで大きくなっている。偏差流速比を断

面全体で平均すれば、前述の偏差流量比と基本的に同じであるが、計測した各グリッドの計測精度を評価できる指標として有効である。

## 5. 結論

本研究では、ADCPを用いた洪水流観測における計測精度評価手法の総括として、ADCPの計測値に影響を及ぼす主要因を挙げて定量的な評価を行い、著者らが提案する評価指標を四万十川の洪水流量観測結果に適用した。本研究で明らかとなった点を以下にまとめる。

- 1) わが国特有の高流速で、水面変動が大きい洪水流の観測を行う際には、河床変動による計測精度の低下およびボートの跳躍や計測適用範囲を超える揺動によるデータ欠損を最小限に抑えるためにADCPにRTK-GPSの併用が有効である。
- 2) 利根川高速流部における現地観測結果から、ADCP搭載ボートの揺動がADCPの水深および流速値に及ぼす影響は小さく、厳しい条件の洪水流計測においても傾斜角を15度以下に抑え、確実にデータを取得することができれば、各地点における単位幅流量の計測精度は最大でも5%程度である。
- 3) 2)の結果に基づいて、四万十川においてADCPを用いた洪水流観測では5000m<sup>3</sup>/s規模の洪水流量計測に成功した。さらに、著者らが提案するADCPの機器性能上の精度である偏差流速を適用した結果、ADCPで計測された断面流量に含まれる誤差流量の比を表わす偏差流量比は、5095 m<sup>3</sup>/sで1.6%、3992 m<sup>3</sup>/sで1.4%であった。

本研究で行った現地観測により、ADCPを搭載したボートが計測時に揺動することによって、計測精度が低下するという著者らが当初想定していたものとは異なる結果が得られた。木下<sup>11)</sup>が静水中においてADCPの計測精度検証を行った後、洪水流を想定した計測精度検証は困難と考えられてきたが、高精度の計測機器や通信システム等を用いた詳細な実験および現地観測を通じて、これらの計測特性を明らかにした点は今後の洪水流観測において極めて重要な知見となった。この成果により、著者らがこれまでに行ってきたADCPを用いた洪水流観測に係わる基礎的な観測技術、データ処理法および計測精度評価法がほぼ確立できたといえる。ADCPを用いた観測技術は、断面流量を計測する目的から今後さらに応用的なものへ発展が期待されている。特にADCPを用いた流況と河床変動の同時計測技術や浮遊砂濃度の推定技術の構築は、著者ら<sup>12),13)</sup>の検討に限らず、国内外で精力的に進められており、これまで十分に計測されてこなかった実河川における洪水時の土砂移動現象を解明していく可能性を持っている。

所にご配慮いただいた。また、四万十川の現地観測に関しては、国土交通省河川技術研究開発公募(地域課題分野)「ADCP観測および流況解析に基づいた浮子流観データの検証と河川計画への反映に関する研究」の一環として行った。国土交通省中村河川国道事務所には、資料提供や現地観測に際してご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2005-5183.
- 2) 岡田将治, 橋田隆史, 森本精郎, 増田稔: ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 水工学論文集, 第52巻, pp.919-924, 2008.
- 3) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 出口恭: ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察, 河川技術論文集, 第14巻, pp.295-300, 2008.
- 4) 岡田将治, 萬矢敦啓, 橋田隆史: ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響, 水工学論文集, 第54巻, pp.1087-1092, 2010.
- 5) Okada S., Yorozuya A. and Kitsuda T.: Effect of Fluctuation of a Moving Boat Equipped with ADCP on Velocity-Profiles and Water-Depth Measurements, Proc. of XXXIII (33rd) IAHR CONGRESS, 2009.
- 6) 橋田隆史, 下田力, 疋田真, Hening Huang: ADCPによる河川洪水観測の先進技術と観測に際しての基礎的な技法について, 水文・水資源学会河川流量観測高度化研究会, 河川流量観測の新時代, pp.19-25, 2010.
- 7) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
- 8) 萬矢敦啓, 岡田将治, 橋田隆史, 菅野裕也, 深見和彦: 高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案, 河川技術論文集第16巻, pp.59-64, 2010.
- 9) TELEDYNE RD INSTRUMENTS: ADCP Coordinate Transformation, Formulas and Calculations, P/N 951-6079-00, 2008
- 10) 門田章宏, 岡田将治: ADCPを用いた洪水流観測データに基づいた橋脚構造物周辺の三次元流況解析, 水工学論文集, 第55巻, 2011. (投稿中)
- 11) 木下良作: ADCPと無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について, 農業土木学会平成15年度応用水理研究部会特別講演録, 2003.
- 12) 萬矢敦啓, 岡田将治, 江島敬三, 菅野裕也, 深見和彦: ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定方法, 水工学論文集, 第54巻, pp.1093-1098, 2010.
- 13) 橋田隆史, 岡田将治, 新井励, 下田力, 熊田康邦: ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例, 河川技術論文集, 第12巻, pp.133-138, 2006.